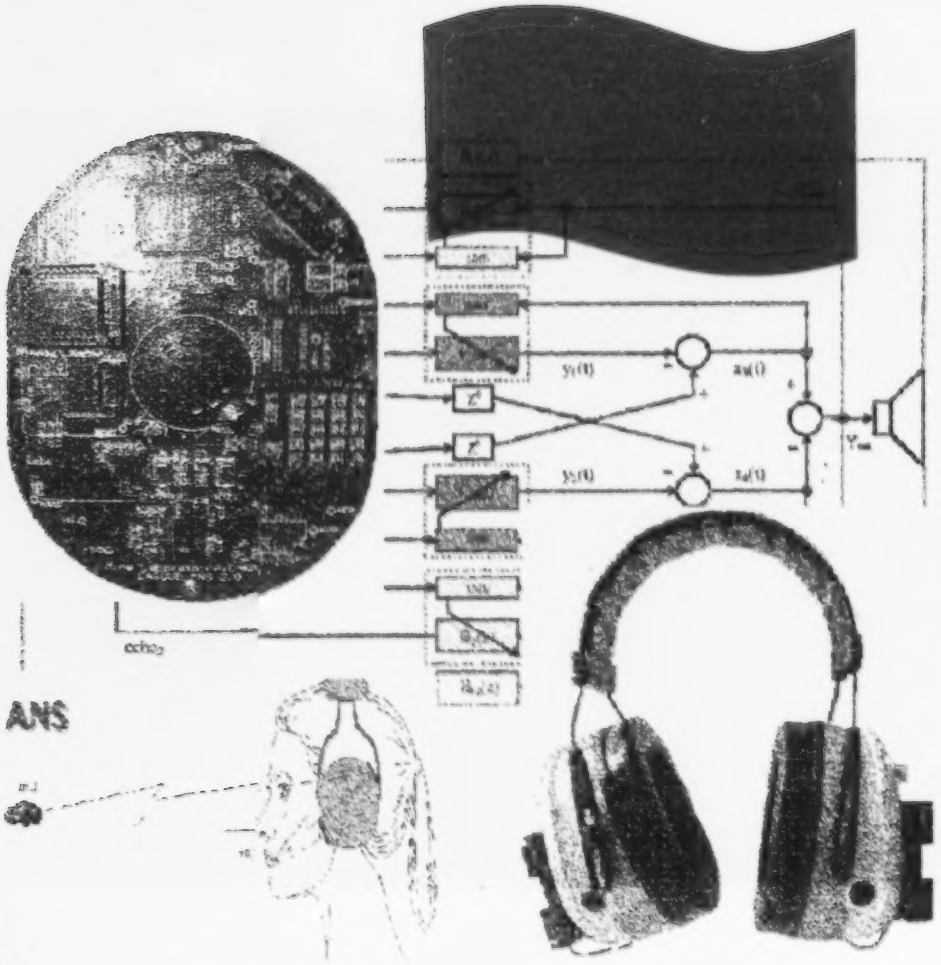
Conception d'un protecteur auditif à suppression de bruits dominants

ÉTUDES ET RECHERCHES

René Le
Pierre Laliberté

R-361

RAPPORT



irsst

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

MISSION

- Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.
- Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.
- Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission de la santé et de la sécurité du travail.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec
2004
ISBN : 2-551-22450-0
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1551
Télécopieur : (514) 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, février 2004

Conception d'un protecteur auditif à suppression de bruits dominants

ÉTUDES ET RECHERCHES

René Le, Département des sciences appliquées, UQAT

Pierre Laliberté, Ressources naturelles Canada, Laboratoires des mines et des sciences minérales de CANMET, Programme de mécanisation et automatisation minière

RAPPORT

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

105-00123/

SOMMAIRE

L'environnement minier souterrain est un environnement particulièrement bruyant dû aux équipements et accessoires générant de forts bruits qui y sont utilisés: foreuses, jumbos, chargeuses-navettes, camions, locomotives, ventilateurs etc. De plus, ces mêmes bruits sont amplifiés à cause de la réverbération sur les parois rocheuses et le confinement en espace clos. Malgré le port de protecteurs auditifs personnels, le travailleur minier peut tout de même développer un problème de surdité après un certain nombre d'années d'exposition à des bruits élevés. Le travailleur a aussi besoin d'entendre certains sons utiles dans le cadre de son travail. La sécurité de ce dernier en dépend. Par exemple, un simple craquement du roc peut être le signe d'une chute imminente du toit de la galerie où il se trouve. L'arrivée de véhicules miniers téléguidés ou autoguidés dans le milieu minier a aussi renforcé cette demande pour un système de protection auditif capable de laisser passer les signaux utiles tout en bloquant le bruit fort provenant des équipements. Finalement, les communications, par radio ou de vive voix, sont assez pénibles en présence de bruits forts. Un système permettant de communiquer facilement en milieu bruyant serait donc souhaitable.

Afin de régler cette problématique, il a été proposé de développer un protecteur auditif numérique à suppression de bruits dominants. Ce protecteur auditif atténuerait les bruits environnants tout en laissant passer les signaux utiles tels que la voix et les signaux d'alarme. Le programme en mécanisation et automatisation minière de la Mine-laboratoire LMSM-CANMET, situé à Val-d'Or, fut chargé de faire la conception d'un circuit électronique fonctionnel. Ce circuit utiliserait un processeur de signaux numériques (DSP) conçu spécialement pour traiter, à grande vitesse et en temps réel, des signaux numériques issus de la conversion de signaux analogiques. La programmation de l'algorithme, à implanter dans le DSP, fut confiée à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).

Deux prototypes de protecteurs auditifs furent développés, fabriqués et finalement programmés. Ces derniers ont permis de vérifier en partie que les bases de l'algorithme développé sont fonctionnelles. Les tests effectués démontrèrent que l'algorithme est capable de réduire l'amplitude d'un signal fort et simple, tel qu'une onde sinusoïdale, tout en restituant des signaux de voix présents dans le signal d'origine.

De nouveaux processeurs digitaux, plus puissants et plus performants, mais surtout l'ajout de chercheurs spécialisés dans le domaine des phénomènes acoustiques et dédiés entièrement à ce projet, pourraient permettre la poursuite du développement des algorithmes. Une fois ces algorithmes mis au point, un prototype fonctionnel et capable de rencontrer les besoins de l'industrie minière pourrait être fabriqué et commercialisé.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE i
TABLE DES MATIÈRES ii
LISTE DES FIGURES iii

INTRODUCTION 1
RAPPEL DE L'OBJECTIF PRINCIPAL DU PROJET DE RECHERCHE 3
MÉTHODES 4
RÉSULTATS 6
- DÉVELOPPEMENT DES CIRCUITS ÉLECTRONIQUES 6
- DÉVELOPPEMENT DU MONITEUR ET DE L'INTERFACE POUR ORDINATEUR 10
- RÉSULTATS DES TESTS DE L'ALGORITHME DE SUPPRESSION DE BRUITS DOMINANTS 11

DISCUSSION 17
- AMÉLIORATIONS PROJETÉES POUR LE CIRCUIT ÉLECTRONIQUE ANS 17
- AMÉLIORATIONS PROJETÉES POUR LE PROCÉDÉ ANS 17
- POURSUITE DE L'ÉTUDE SUR LE PROCÉDÉ ANC 17

CONCLUSION 19
APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS 20
RETOMBÉES ÉVENTUELLES 21
BIBLIOGRAPHIE 22
- BREVETS 22
- ARTICLES ET REVUES 23-24

ANNEXE 1 - PRINCIPE DE BASE DE L'ANC ET DE L'ANS 25
- ACTIVE NOISE CANCELLING (ANC) 27
- ACTIVE NOISE SUPPRESSION (ANS) 28

ANNEXE 2- DÉTAILS SUR L'ANS 31
- RÔLE DES LIGNES À RETARD PURES 30
- CONTRAINTES DANS LA LONGUEUR MINIMALE DES FILTRES G1 ET G2 31

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Circuit électronique de la version 1.0 6
Figure 2 – Circuit électronique de la version 2.0 8
Figure 3 – Protecteur auditif complet 9
Figure 4 – Apperçu du logiciel ANSLITE 11
Figure 5 – Structure de base FIR 12
Figure 6 – Structure ANS à un niveau symétrique 13
Figure 7 – Bruit dominant et parole avant traitement 15
Figure 8 – Bruit et parole après traitement 15
Figure 9 – Principe de base de l'ANC 27
Figure 10 – Principe de base de l'ANS 28
Figure 11 – ANS à 2 microphones 29
Figure 12 – Distance entre les microphones 33

INTRODUCTION

L'environnement minier souterrain est un environnement particulièrement bruyant dû aux équipements et accessoires générant de forts bruits qui y sont utilisés: foreuses, jumbos, chargeuses-navettes, camions, locomotives, ventilateurs etc. De plus, ces mêmes bruits sont amplifiés à cause de la réverbération sur les parois rocheuses et le confinement en espace clos. Malgré le port de protecteurs auditifs personnels, le travailleur minier peut tout de même développer un problème de surdité après un certain nombre d'années d'exposition à des bruits élevés. Le travailleur a aussi besoin d'entendre certains sons utiles dans le cadre de son travail. La sécurité de ce dernier en dépend. Par exemple, un simple craquement du roc peut être le signe d'une chute imminente du toit de la galerie où il se trouve. L'arrivée de véhicules miniers téléguidés ou autoguidés dans le milieu minier a aussi renforcé cette demande pour un système de protection auditif capable de laisser passer les signaux utiles tout en bloquant le bruit fort provenant des équipements. Finalement, les communications, par radio ou de vive voix, sont très difficiles en présence de bruit fort. Un système permettant de communiquer facilement en milieu bruyant serait donc très important pour la sécurité des travailleurs.

La surdité est une maladie professionnelle très importante au Québec. Selon les statistiques sur les lésions professionnelles émises par la CSST, elle est une des maladies professionnelles les plus fréquentes reliées au domaine minier. Les coûts directs et indirects pour la société sont très élevés.

Actuellement, les travailleurs miniers utilisent des protecteurs auditifs personnels, tels que des coquilles et/ou bouchons, afin de se protéger des bruits forts auxquels ils sont exposés. Ce type de protection permet d'abaisser la perception du niveau sonore du bruit environnant à un niveau acceptable mais a le désavantage de réduire aussi le niveau sonore des signaux utiles comme ceux de la parole et des signaux d'alarme, d'urgence ou tout autres signaux jugés importants pour la sécurité des travailleurs.

Dans le but d'alléger le texte, le terme «signaux vocaux» désignera tous signaux utiles comme ceux de la parole, des signaux d'alarme et d'urgence ou tout autres signaux jugés importants pour la sécurité des travailleurs.

Les coquilles de protection auditive ont beaucoup évolué. Au départ, les coquilles passives pouvaient atténuer en moyenne –27 dB. L'arrivée de l'électronique et de la miniaturisation a permis aux coquilles d'évoluer vers des procédés actifs qui peuvent venir renforcer l'atténuation jusqu'à –40 dB. Certaines fonctionnent sur un principe d'annulation de bruit (Active Noise Cancelling). Ce principe fonctionne en envoyant une onde de phase inverse aux sons environnants vers l'oreille. Le signal résultant à l'oreille est surveillé et l'onde inverse contrôlée de façon à ce que cette résultante soit presque nulle. Le désavantage de cette méthode est que tous les signaux vocaux, utiles ou non, sont également annulés.

Afin de régler cette problématique, il a été proposé de développer un protecteur auditif numérique à suppression de bruits dominants basé sur le principe ANS (Active Noise Suppression). Ce protecteur auditif atténuerait les bruits environnants tout en laissant passer ou même amplifiant les signaux vocaux. Le programme en mécanisation et automatisation minière

de la Mine-laboratoire LMSM-CANMET, situé à Val-d'Or, fut chargé de faire la conception d'un circuit électronique fonctionnel tandis que la programmation de l'algorithme fut confiée à l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT).

Le présent rapport résume les travaux effectués dans le projet de conception d'un protecteur auditif à suppression de bruits dominants. Ce dernier passera en revue le début du projet en passant par la conception des circuits électroniques constituant le protecteur auditif. Ces circuits électroniques sont à la base même du projet car ils servent de système de développement pour les différents algorithmes testés.

Les travaux de développement du programme moniteur ANSMON réalisés par les chercheurs de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT), seront décrits. Ce programme est, en réalité, un système d'exploitation pour les circuits électroniques ANS développés. Ce système d'exploitation sert à effectuer la mise en fonction de l'algorithme de suppression de bruits, la mise à jour du programme ANS ainsi que sa propre mise à jour par communication série.

Un aperçu des travaux sur le programme d'interface, qui permet la communication entre le protecteur auditif et un ordinateur PC hôte, sera décrit. Ce programme sert à effectuer le transfert des programmes compilés vers le circuit électronique du protecteur auditif ANS.

Finalement, l'avancement des travaux sur l'algorithme de traitement ANS, qui est le cœur de ce projet, sera détaillé. Afin de faciliter la compréhension du texte par le lecteur, une brève explication des principes de suppression de bruit ANS (Active Noise Suppression) et d'annulation de bruit ANC (Active Noise Cancelling) se trouve en annexe.

RAPPEL DE L'OBJECTIF PRINCIPAL DU PROJET DE RECHERCHE

L'objectif principal consistait à concevoir et réaliser un protecteur auditif muni d'un procédé de suppression de bruits dominants, permettant de réduire les bruits forts des équipements miniers, tout en laissant passer les signaux vocaux. Il faut se rappeler que le terme «signaux vocaux» désigne tous signaux utiles comme ceux de la parole, des signaux d'alarme et d'urgence ou tout autres signaux jugés importants pour la sécurité des travailleurs.

Plus spécifiquement, le projet visait particulièrement la conception et la réalisation d'un circuit électronique fonctionnel et portatif permettant de supprimer efficacement les bruits dominants. Le circuit électronique conçu devait être installé dans une coquille existante de façon à pouvoir faire des essais de performance dans un milieu minier souterrain.

MÉTHODES

L'idée proposée était de produire un prototype fonctionnel, se rapprochant d'une version commerciale, qui pourrait être amené sur le terrain et servir pour l'expérimentation et le développement de l'algorithme antibruit. Le travailleur minier, appelé à se déplacer continuellement lors de son travail, ne peut être relié à un système fixe comme, par exemple, dans le domaine de l'aviation. Certaines solutions proposent un système comportant des capteurs reliés à la machine source de bruit. Le lien peut être fait soit par câble, soit par transmission radio, et sert à acheminer l'information du bruit vers le protecteur auditif. Cette solution demande que tous les équipements, sources de bruits, soient équipés de tels capteurs. Cette solution est peu pratique dans un milieu où il y a un grand nombre d'appareils générant de forts bruits et qui sont en perpétuels déplacements. Il fallait donc développer un protecteur auditif autonome, de petites dimensions, ne demandant pas d'intervention de son utilisateur et n'exigeant aucune infrastructure pour son fonctionnement.

Le système devait comporter des composantes électroniques miniaturisées. Le choix d'un circuit digital plutôt qu'analogique est dû au fait qu'un circuit digital à microprocesseur peut facilement être modifié par simple programmation. Un circuit analogique demande que les composantes discrètes soient dessoudées pour en changer la valeur. De plus, la tolérance de chaque pièces discrètes provoque des différences dans les performances d'un circuit à l'autre. Le choix d'un circuit analogique demande que l'architecture soit fixée et ne pourra être modifiée par la suite. Dans une version à microprocesseur, l'architecture est établie par programmation et peut donc être modifiée en tout temps. Comme les travailleurs miniers devraient porter ce système sur une période allant jusqu'à 8 heures d'affilée et qu'il devait à l'origine être alimenté par la batterie de la lampe de mineur, il fallait aussi prendre en compte la consommation énergétique dans le choix des composantes.

Un aspect particulier de ce projet est l'orientation vers le bruit fort. Alors que la plupart des études de traitement antibruit se concentrent sur un rapport signal/bruit qui demeure en faveur du signal utile (dB positif), notre cas est concentré vers les bruits qui dominent le signal utile (un rapport signal/bruit négatif). La méthode devait donc inverser ce rapport de façon à réduire le niveau du bruit et rehausser le niveau des signaux vocaux.

L'équipe de la Mine-laboratoire LMSM-CANMET devait se charger de la conception d'une première version du circuit numérique du protecteur auditif alors que l'équipe de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) se chargerait du développement de l'algorithme de suppression de bruits et du programme résidant faisant office de système d'exploitation et servant à faire le lien avec un ordinateur pour télécharger de nouvelles versions de programme sur le circuit.

Le travail sur la version digitale 1.0 du circuit débuta en 1999. Il fallait se baser sur le circuit entièrement analogique conçu auparavant et le convertir en une version à microprocesseur numérique dont les dimensions permettraient l'implantation dans une coquille existante. L'architecture retenue s'inspirait d'un kit de développement conçu par Analog Devices mais

dont la puissance de traitement et les dimensions physiques ne correspondaient pas aux besoins de l'application.

Des kits de développement ADSP-2181-EZLITE basés sur le processeur ADSP-2181 ont été achetés afin que l'équipe de l'UQAT puisse commencer le développement de l'algorithme et du programme moniteur en attendant la fabrication du premier circuit électronique miniaturisé.

Le choix du processeur DSP (Digital Signal Processor), pour le prototype, s'est porté vers le ADSP-2189M d'Analog Devices. Ce processeur était le plus récent à l'époque dans la configuration 16 bits. Sa capacité de traitement de 75 MIPS (millions d'instructions par secondes) était supérieure à celle du ADSP-2181 (40 MIPS) du kit de développement. De plus, ce processeur peut être alimenté à une tension de 3.3 volts au lieu de 5 volts. Cela rend l'alimentation par pile beaucoup plus simple. Il faut garder en mémoire que le protecteur auditif devra fonctionner soit à pile, soit alimenté par la batterie de la lampe du travailleur minier.

L'interface audio (CODEC) retenue a été le AD73322 d'Analog Devices pour ses performances, sa faible consommation énergétique et la possibilité de l'alimenter à 3.3 volts lui aussi. La mémoire externe EEPROM a été changée pour de la mémoire FLASH dont les caractéristiques lui permettent d'être programmée et effacée sans la retirer du circuit électronique. Cette fonctionnalité est pratique lors du développement de l'algorithme car cela fait gagner du temps en plus de diminuer la manipulation du circuit électronique et ainsi les risques d'endommager le circuit.

Les schémas électroniques ainsi que les plans de circuits imprimés furent préparés avec le logiciel Protel en début d'année 1999 à la Mine-laboratoire LMSM-CANMET de Val-d'Or. Beaucoup de temps a été consacré au choix des composantes en fonction de leurs caractéristiques techniques mais aussi en fonction de leur disponibilité sur le marché. Lorsque c'était possible, des essais sur planche de développement ont été faits afin de vérifier le fonctionnement de certaines pièces.

Le développement du programme moniteur et des algorithmes, sur les kits de développement, débuta à l'été 1999 avec l'embauche par l'UQAT de deux étudiants. En décembre 1999, la version 1.0 du circuit électronique fut livrée à l'UQAT pour implantation de l'algorithme et du programme moniteur.

Les étapes du développement de l'algorithme ont débuté par l'élaboration d'une structure à partir de filtres adaptatifs simples, puis par l'élimination des types de bruits miniers, afin de déterminer les coefficients des algorithmes. Par la suite, la vitesse de convergence des algorithmes a été diminuée pour discriminer les signaux de bruits monotones des signaux vocaux variant dans le temps. Finalement un détecteur d'activité vocale a été implanté afin de bloquer l'adaptation en présence de ces derniers.

La section suivante donne le détail des résultats obtenus.

RÉSULTATS

Développement des circuits électroniques

Deux ensembles de coquilles complètes furent livrés à l'UQAT, par la Mine-laboratoire LMSM-CANMET, en décembre 1999 afin que le développement de l'algorithme s'effectue dans des conditions réelles. La figure 1 montre les deux faces du circuit imprimé de forme ovale avec les composantes soudées. Ce circuit représente la moitié d'une coquille puisque chaque coté de cette dernière est composé d'un circuit électronique totalement indépendant.

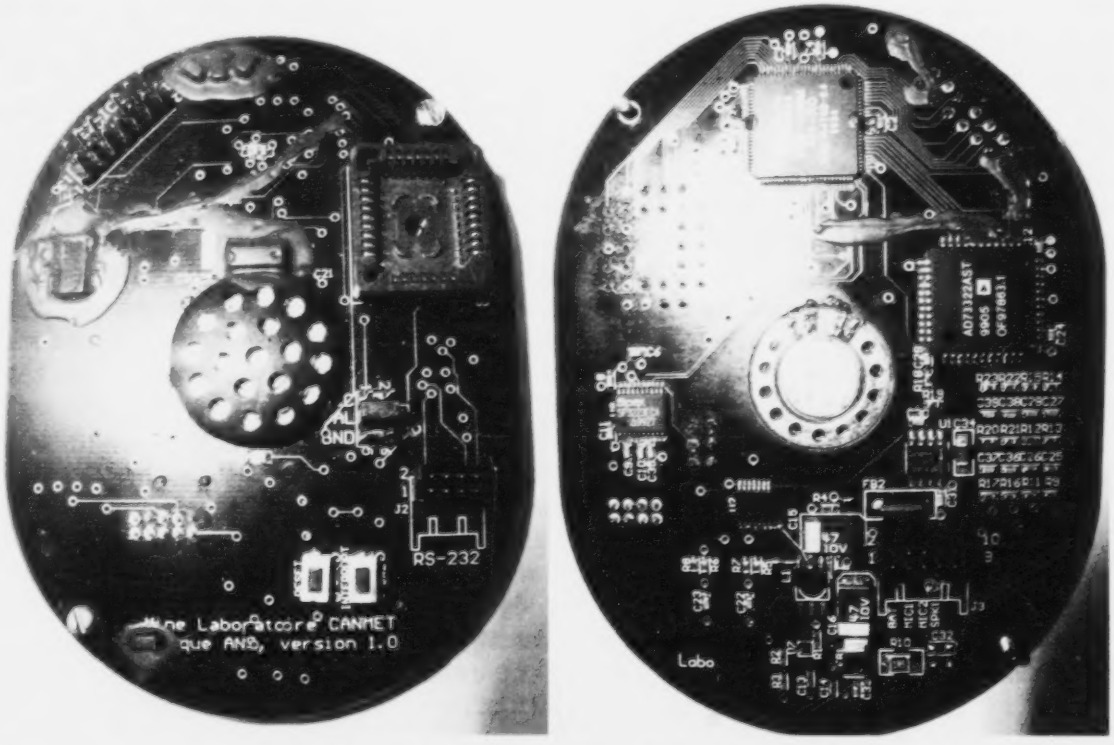


Figure 1 – Circuit électronique de la version 1.0

Ce circuit imprimé a été fabriqué avec la technologie multicouche. Les composantes sont soudées sur les deux couches externes et les deux couches internes servent de plan de distribution de l'alimentation et de la masse. Les plans de masse ont été séparés en un plan de masse analogique et un plan de masse digital selon les règles de l'art afin de minimiser le bruit électrique.

Comme c'est souvent le cas avec la première version d'un circuit électronique, la version 1.0 n'était pas fonctionnelle à 100%. Certaines erreurs de conception et d'interprétation de fiches

techniques ont mené à des erreurs sur le circuit imprimé. Il a donc fallu corriger les erreurs directement sur le circuit de façon à le rendre fonctionnel.

Une première version de l'algorithme ANS pour ce circuit fut implantée en janvier 2000, ainsi que le programme moniteur. Les performances de cette version étant assez limitées à cause du nombre de modifications apportées au circuit, il fut décidé d'entreprendre la fabrication d'une version 2.0 du circuit électronique en tenant compte des erreurs commises lors de la conception de la version 1.0 ainsi qu'en fonction de nouveaux besoins.

L'architecture du circuit fut modifiée pour y ajouter un deuxième CODEC AD73322 au lieu d'un seul et de trois microphones au lieu de deux. Le troisième microphone servira plus tard à faire des essais d'ANC (Active Noise Cancelling) en plus du principe ANS. Un haut-parleur avec une meilleure courbe de réponse en fréquence a été choisi.

Toute la partie alimentation et régulation a été modifiée car il faut respecter une séquence lors de l'alimentation du circuit électronique. Tout d'abord, il faut alimenter le cœur du DSP à 2.5 V puis, lorsque tout le circuit est stable, alimenter le reste du circuit à 3 V. Finalement le régulateur de tension relâchera l'entrée RESET du DSP pour que le programme principal soit exécuté.

L'amplificateur audio, pour le haut-parleur, a été changé pour un autre ne nécessitant pas un gros condensateur de découplage en série. Ce dernier diminuait les performances en basse fréquence.

Le circuit a aussi été modifié en prévision de l'utilisation avec un seul CODEC. Des emplacements ont été prévus à cette fin pour y souder des cavaliers. La disposition des pièces, connecteurs et interrupteurs est maintenant plus facile d'accès pour les expérimentateurs lors des divers essais sur le protecteur auditif. Deux interrupteurs à l'extérieur de la coquille ont été ajoutés pour faciliter l'utilisation lorsque le protecteur auditif est porté sur la tête. Finalement, plusieurs points de vérification ont été ajoutés afin de faciliter la prise de mesure lors d'éventuelle mise au point.

La figure 2 montre le circuit électronique (version 2.0) monté dans une coquille. On peut y voir l'emplacement du troisième microphone en face du haut-parleur. Ce circuit fut livré à l'UQAT en décembre 2000. Il était entièrement fonctionnel.

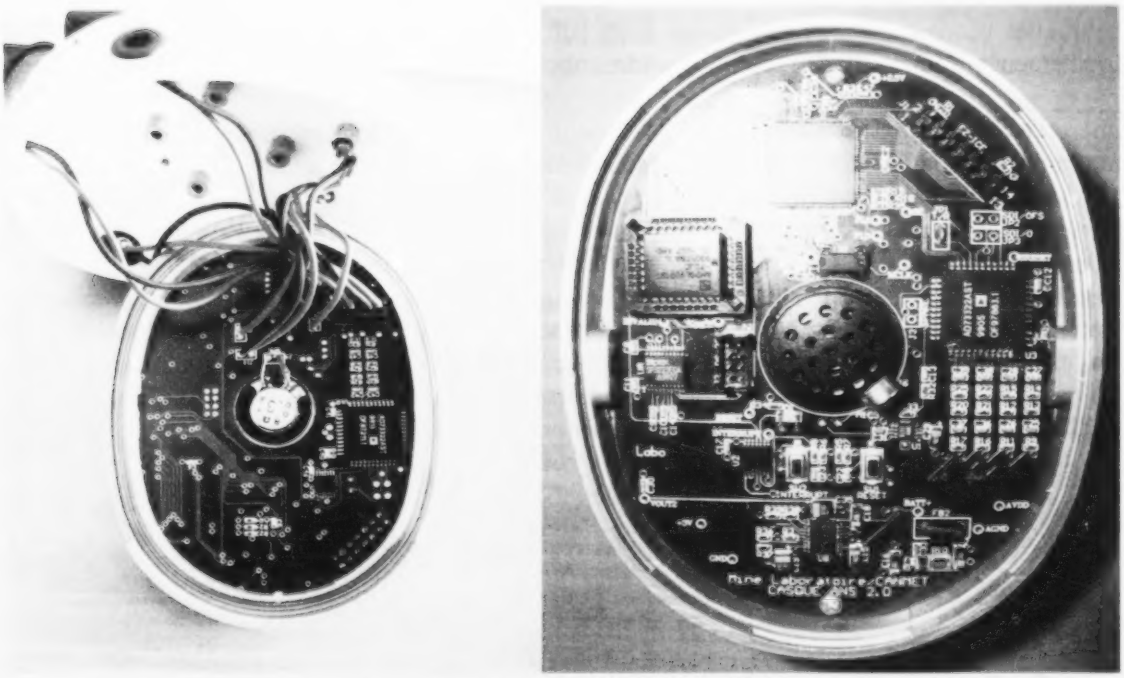


Figure 2 – Circuit électronique de la version 2.0

La figure 3 montre un protecteur auditif complet constitué de deux circuits indépendants montés dans les coquilles Oris-Intruder EM7209 fournis gracieusement par la compagnie ARKON Safety. Cette version du protecteur auditif ANS fut utilisée pour le développement de l'algorithme ANS et ce, jusqu'à la fin du présent projet.

Pour cette version de prototype, l'alimentation est par batteries situées à l'extérieur de la coquille. Dans une version commerciale, ces dernières pourraient être encastrées dans une coquille spécialement moulée pour ce produit.

Figure 3 – Protecteur auditif complet

Développement du moniteur et de l'interface pour ordinateur

Pour développer et transférer le programme dans la mémoire FLASH du circuit électronique et le tester à de multiples reprises, il fallait un environnement de développement performant. Le choix du langage pour créer l'interface de développement était VisualCafé 3.0 de Symantec. Par la suite, VisualCafé 4.0 de Webgain fut utilisé pour compléter la programmation. En mai 1999, un étudiant de l'UQAT a été engagé, par l'UQAT, pour réaliser le logiciel. Le programme résident ANSMON 1.0 a été créé pour le circuit ANS et un programme ANSLITE 1.0 a été créé pour Windows 9x/NT. Toutefois, l'interface entre Java et le DOS de Windows NT ne permet pas de lancer correctement le compilateur d'Analog Devices qui été conçu pour le DOS. Cette interface ANSLITE est donc utilisée uniquement sous Windows 98.

Le programme résident ANSMON comporte certaines fonctionnalités intéressantes. Par exemple, au moment de la remise à zéro (RESET), le programme moniteur fait un diagnostic et détecte la présence du câble RS-232 relié à un ordinateur, dès lors il s'engagera dans le mode de communication avec l'ordinateur hôte et attendra le premier caractère spécial (NULL) qui lui permettra de synchroniser sa vitesse sur celui de l'ordinateur hôte. Dans le cas contraire, il chargera le programme de traitement antibruit (ANS, ANC ou autre développé par l'usager). Un second programme peut être démarré au moyen du bouton INTERRUPT. Un second exemple de programme sert simplement à envoyer la différence de signal amplifié des microphones extérieurs vers le haut-parleur situé à l'intérieur de la coquille dans le but de faire certains tests électriques et vérifier le bon fonctionnement des différentes parties du circuit.

L'interface ANSLITE a été produite en 2 versions. L'une pourrait être fournie avec un protecteur auditif complet et permettre de charger de nouvelles versions de programme dans la mémoire haute réservée à cette fin. De cette façon, le protecteur auditif pourrait être adapté en fonction du type de milieu dans lequel il sera appelé à travailler.

L'autre version permet de remplacer la version du programme moniteur (ANSMON) dans la partie basse de la mémoire FLASH. Lorsqu'une version améliorée du programme ANSMON serait disponible, un utilisateur pourrait télécharger, via le site Internet du manufacturier, cette mise à jour pour ensuite la charger lui-même sur le circuit électronique ANS. Le même principe est appliqué pour la mise à jour du BIOS des cartes mères de PC et de plusieurs périphériques informatiques.

La figure 4 démontre un aperçu de l'interface de développement ANSLITE. Bien entendu, on ne pourra démontrer toutes les fonctionnalités que lors de son installation et en suivant son guide d'utilisation.

Figure 4 – Apperçu du logiciel ANSLITE

Résultats des tests de l'algorithme de suppression de bruits dominants

La première structure a été conçue par le professeur René Le de l'UQAT. Il s'agit d'un simple filtre FIR adaptatif sur le critère LMS (Least Mean Square Error). Ce premier algorithme a permis de démontrer que le critère LMS, bien différent du mode de fonctionnement du modèle analogique, réalisait néanmoins de façon automatique les mêmes objectifs. En effet, le modèle analogique se servait de discriminateurs pour détecter le passage par zéro des signaux pour estimer le retard entre les signaux et rectifier le délai. Un comparateur automatique de gain permettait de rectifier les amplitudes des signaux pour qu'ils aient la forme la plus ressemblante avant la soustraction. Dans le critère LMS, la mise à jour des coefficients réalisait, d'un même coup, l'égalisation des niveaux et l'égalisation des délais, du moins en théorie, sur des signaux simples et sous toutes réserves pour les signaux complexes.

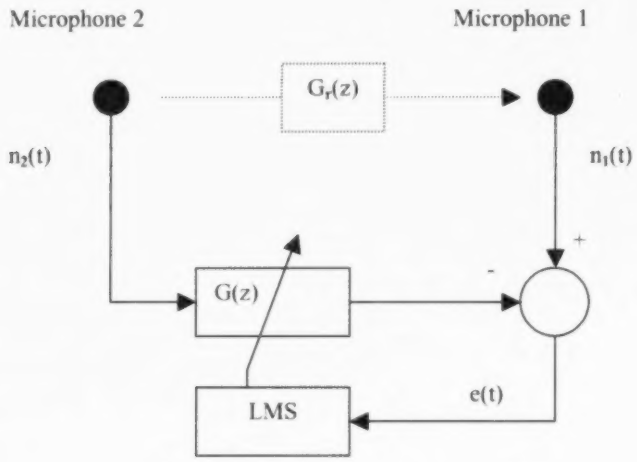


Figure 5 – Structure de base FIR

Dans les filtres numériques adaptatifs, le critère du moindre carré instantané de l'erreur servait à réajuster les coefficients d'un filtre FIR (Finite Impulse Response), selon la formule suivante:

$$G_k(t+1) = G_k(t) - 2\mu e(t) \times n_2(t-k)$$

où $G_k(t+1)$ représente le coefficient k du filtre G au prochain instant (t+1). $G_k(t)$ représente la valeur actuelle du coefficient k du filtre, e(t) est l'erreur instantanée entre la sortie du filtre et la réponse souhaitée, ici $e(t) = n_1(t) - n_2(t) \times G(t)$. Enfin, le coefficient μ est le facteur de contrôle de la vitesse de convergence (learning rate factor).

En somme, le filtre G(z) est employé de façon à effectuer un morphage avec le signal $n_2(t)$ pour qu'il ressemble le plus possible au signal $n_1(t)$. C'est ce qu'on appelle aussi l'identification du conduit entre le point où se situe le microphone 2 et le microphone 1. G(z) doit ressembler le plus exactement possible au conduit réel $G_r(z)$.

Dans le cas de l'ANC, le microphone 2 est situé à l'extérieur de la coquille auditive et le microphone 1 est situé à l'intérieur. On désigne alors le microphone 1 de microphone d'erreur et le 2 de microphone auxiliaire. Dans le cas de l'ANS, les deux microphones sont situés à l'extérieur de la coquille. Le microphone d'erreur de l'ANC devient le microphone secondaire en ANS. Le haut-parleur est utile pour restituer les signaux vocaux bloqués par la coquille mais ne serait pas nécessaire dans les signaux d'entrée de système de reconnaissance de la parole ou de commande vocale. Ce dernier serait branché sur le signal e(t) via un amplificateur audio.

Dans l'implantation sur le circuit électronique du protecteur auditif, il y a deux filtres symétriques (Figure 6). Pour le premier filtre, le microphone 1 sert de signal de référence à imiter par le signal provenant du microphone 2. Pour l'autre filtre, c'est le microphone 2 qui sert

de signal de référence à imiter. Ce schéma n'est pas exclusif car il a été cité dans l'article de LeBouquin-Jeannès 01.

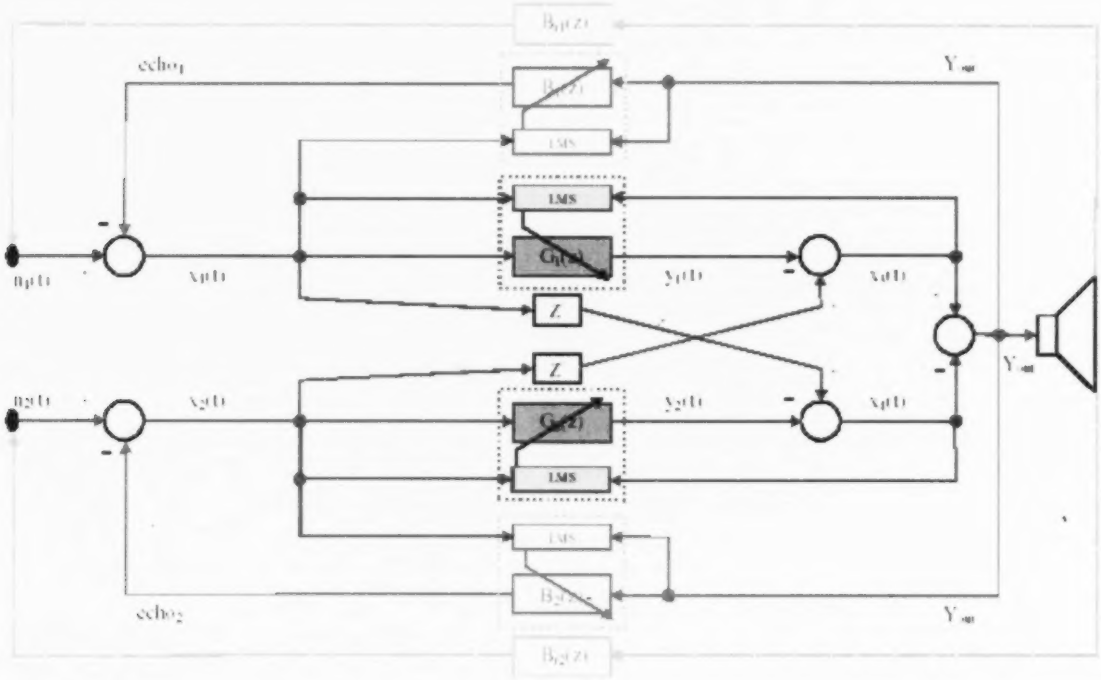


Figure 6 – Structure ANS à un niveau symétrique

Tout le principe de l'ANS est basé sur un filtre adaptant automatiquement G(z) pour qu'il essai d'imiter le plus précisément possible le signal $n_2(t)$ en un signal $n_1(t)$. Cette adaptation peut progresser lentement, et doit se baser sur un bruit répétitif. En présence de signaux non répétitifs, tels que la parole ou des signaux d'alarme, le filtre numérique n'aura pas le temps de réagir et les signaux vocaux ne seront alors pas imités par le filtre. Il s'ensuit, par la soustraction $n_1(t) - G(t) \times n_2(t)$, que les composantes du signal que le filtre n'a pas pu imiter ne peuvent pas être annulées, laissant ainsi un résidu ressemblant aux signaux vocaux.

Toutefois, de façon générale, pour que l'imitation soit parfaite, le filtre doit reproduire la complexité du conduit. La vitesse de fonctionnement du ADSP2189M est de 75 MHz, ce qui permet d'implanter un filtre d'au plus 100 coefficients à la vitesse d'échantillonnage de 70 KHz. Or, les simulations sur Matlab et Simulink montrent que le filtre n'est pas assez long, ce qui conduit à une imitation inefficace de l'autre signal $n_1(t)$.

La longueur du filtre numérique de 100 coefficients est néanmoins suffisante pour démontrer la suppression d'une onde sinusoïdale d'intensité très forte tout en laissant passer les signaux vocaux. Sur un signal sinusoïdal pur, d'intensité très forte, le critère LMS s'ajuste facilement sur la sinusoïde et l'annule. La résultante est alors la restitution des sons ambiants, qui eux n'ont pas

été annulés. Des essais ont aussi été faits avec 1024 coefficients en réduisant la vitesse d'échantillonnage à 7KHz. Les résultats se sont avérés similaires.

Par contre, les performances dans la suppression d'ondes complexes, comme les bruits miniers, sont beaucoup plus réduites. Bien que le système reste stable (pas d'oscillation), l'algorithme LMS est trop simpliste et ne réussit pas à s'accrocher à toutes les fréquences du spectre du bruit. Il n'y a là aucune surprise. En effet, un simple filtre adaptatif de quelques coefficients ne peut modéliser une fonction de transfert complexe.

La plupart des études spécialisées se concentrent sur la vitesse d'adaptation du filtre et de l'annulation de bruit, ce qui est moins important dans notre cas, alors qu'il s'agit plutôt de concevoir une architecture complexe pour que le filtre modélise parfaitement le signal à supprimer.

D'après les simulations avec Matlab et Simulink, il faut choisir la longueur du filtre numérique entre 200 et 600 coefficients. Nous savons déjà qu'un simple algorithme LMS est insuffisant pour traduire la complexité du bruit minier. Il faut donc un filtre à plusieurs étages de traitement dont la structure plus complexe, appelée «super-lattice», ne sera pas discutée dans le présent document étant donné qu'elle fera l'objet d'un brevet et d'une propriété intellectuelle. Il reste donc à implanter cette structure dans un processeur plus puissant, car celui utilisé, le ADSP2189M, ne fait que 75 MIPS. Le Blackfin (ADSP21532) d'Analog Devices, qui fait 600 MIPS, pourrait permettre l'implantation de ce filtre à structure complexe.

Lors des simulations de l'algorithme, les résultats étaient satisfaisants concernant l'intelligibilité du signal vocal ou de la parole. La simulation permet de réduire considérablement le bruit dominant tout en restituant les signaux vocaux. Les figures 7 et 8 démontrent un exemple de simulation avec Matlab et Simulink dans lequel on traite un fichier de son (RECUL.WAV). Ce fichier correspond à l'enregistrement d'un véhicule tout-terrain minier dont la sirène d'avertissement de recul est en fonction. Une voix, apportant des commentaires, est juxtaposée au bruit. Sur chaque figure, les signaux du haut et du bas représentent le canal gauche et droit. Les fichiers furent enregistrés en mode stéréo.

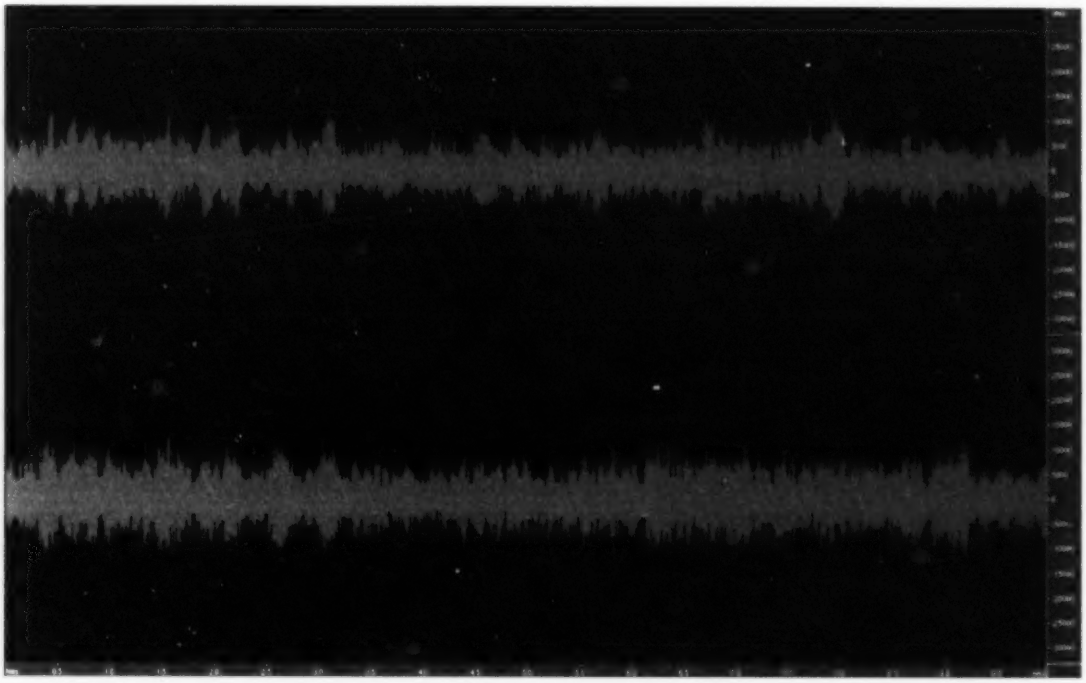


Figure 7 – Bruit dominant et parole avant traitement

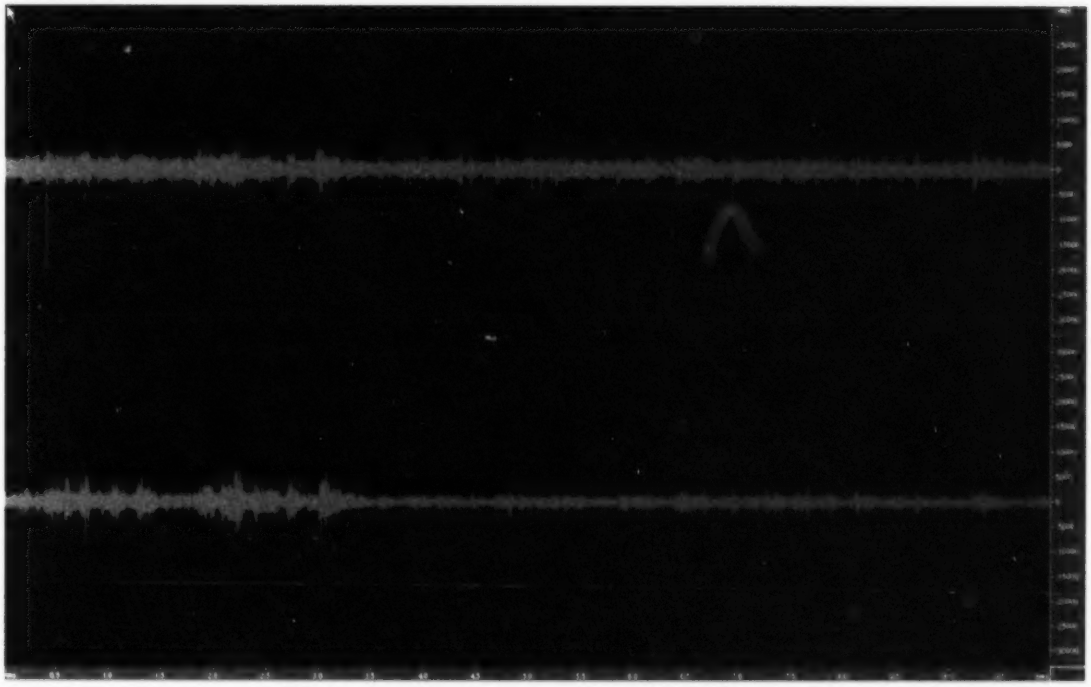


Figure 8 – Bruit et parole après traitement

L'écoute des enregistrements audio traités par l'algorithme en simulation démontre que le bruit fort dominant est atténué alors que les signaux d'avertissement sonore ainsi que les commentaires vocaux ont été restitués. Les longues lignes que l'on voit dans le résultat de la figure 8 sont les instabilités dans le signal de sortie dues au dosage délicat de la valeur des coefficients d'apprentissage de l'algorithme. Cela dépend aussi du type de signal.

Étant donné que le bruit et le signal utile peuvent être dans le même domaine de fréquence, une représentation dans le domaine fréquentiel du signal d'origine et de celui après traitement ne peut concerner qu'une brève portion du signal dans le temps pour un signal instable et non répétitif. Une telle représentation ne serait bonne que pour un court instant et pourrait ne plus être représentatif l'instant d'après. C'est pourquoi l'analyse temporelle a été retenue.

DISCUSSION

Améliorations projetées pour le circuit électronique ANS

Une version 3.0 du circuit électronique ANS est prévue. Elle sera basée sur le récent processeur Blackfin ADSP21532, (600 MIPS) car la vitesse de calcul du 2189M (75 MIPS) est insuffisante pour implanter les autres étages de traitement de l'algorithme. On cherche à remplacer le port série RS-232 par un port USB 1.1 à haute vitesse pour transférer les données acquises par le circuit ANS en temps réel vers l'ordinateur hôte. Ainsi, il sera possible d'afficher l'allure des signaux et suivre l'évolution des coefficients des filtres en temps réel.

Les microphones utilisés au départ étaient des microphones miniatures de 6mm de diamètre de marque PANASONIC. Ils ont dû être changés car ces derniers produisaient un bruit parasite en dessous de 10Hz. L'algorithme demande une certaine stabilité en dessous de 10 Hz car il fait une soustraction de la valeur du signal continu pour éviter la divergence et le blocage dans le fonctionnement des filtres adaptatifs. Le signal parasite venait probablement de la qualité du transistor FET intégré dans chaque capsule de microphone. En changeant pour des microphones Horn Industrial, ce problème a été résolu. Par contre ces microphones ne sont pas faits pour supporter des bruits dont l'amplitude dépasse 130 dB. Or, pour extraire les signaux de faible amplitude, il faut tout d'abord que ces mêmes microphones puissent capter les signaux faibles malgré le bruit fort. Il reste donc à trouver des microphones électrets performants pouvant supporter à la fois les hautes pressions acoustiques et possédant une grande gamme dynamique.

Il a été porté à notre attention que les microphones électrets ont généralement une bande passante qui descend très bas en fréquences jusqu'à des fractions de Hz. L'énergie des signaux acoustiques dans cette bande de fréquences (infra-sons) est généralement bien plus importante que dans la bande audible. En milieu confiné, tel une mine souterraine, les variations de pression dues à la ventilation ou à l'ouverture et la fermeture des portes des stations peuvent facilement faire saturer le signal des microphones. Il est important de couper cette bande de fréquence de façon analogique pour éviter de saturer les entrées analogiques des CODECs et ensuite de façon numérique si on désire une coupure plus efficace ou mieux contrôlée.

Améliorations projetées pour le procédé ANS

Le procédé ANS étant stable et ayant bien fonctionné, il reste maintenant à simuler et à implémenter, dans un nouveau circuit électronique, les autres étages de la structure complexe «super-lattice», afin de trouver la solution pour couvrir un spectre de bruit large bande de façon à pouvoir filtrer beaucoup plus qu'un signal sinusoïdal simple.

Poursuite de l'étude sur le procédé ANC

Le plan de travail sur l'ANC va de pair avec celui de l'ANS. Ils devront être mis en oeuvre conjointement. Tout progrès sur l'ANC donne des indications pour améliorer l'ANS et vice versa. L'ANC renforce la diminution du bruit au niveau de l'oreille, en plus de la protection passive de la coquille. En effet, même si l'ANS avait joué son rôle à 100%, la perception

auditive est que l'ANS est moins efficace car le porteur du protecteur auditif entend quand même le bruit qui passe à travers les parois de la coquille passive. Il s'agira, dans un premier temps, de reproduire le fonctionnement de l'ANC de type analogique, tel qu'existant sur le marché, pour avoir l'expertise de cette mise en œuvre. Ensuite, il faudra chercher à faire fonctionner le premier ANC numérique en large bande, car jusqu'à maintenant, les résultats obtenus équivalent ceux obtenus par d'autres chercheurs, c'est à dire, à annuler une onde sinusoïdale. Les performances d'un tel système diminuent dès qu'il s'agit d'un signal à large spectre dû en partie à une mauvaise normalisation des signaux.

CONCLUSION

L'objectif principal de ce projet de recherche consistait à faire la conception et la réalisation d'un circuit électronique fonctionnel et portatif permettant de supprimer efficacement les bruits dominants et à laisser passer les signaux vocaux. Le circuit électronique conçu devait être installé dans une coquille existante de façon à pouvoir faire des essais de performance dans un milieu minier souterrain.

L'équipe de la Mine-laboratoire LMSM-CANMET s'est chargé de la conception du circuit numérique du protecteur auditif alors que l'équipe de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue (UQAT) devait se charger du développement de l'algorithme de suppression de bruits dominants et des logiciels utilitaires s'y rattachant.

Deux ensembles de coquilles complètes furent livrés à l'UQAT, par la Mine-laboratoire LMSM-CANMET afin que le développement de l'algorithme s'effectue dans des conditions réelles. Ces circuits imprimés ont été fabriqués avec la technologie multicouche et étaient entièrement fonctionnels.

Plusieurs essais furent tentés avec différents algorithmes programmés sur le circuit électronique. Dans le meilleur des cas, les tests ont suffi à démontrer que le circuit est capable de faire la suppression d'une onde sinusoïdale d'intensité très forte tout en laissant passer les signaux vocaux. Par contre, les performances dans la suppression de bruits réels, comme les bruits miniers composés d'ondes complexes, sont beaucoup plus réduites. Le processeur utilisé, n'ayant pas la capacité de traitement suffisante pour faire tous les calculs rapidement, limitait les performances de l'ensemble du circuit électronique.

L'algorithme développé, n'étant pas parfaitement fonctionnel pour l'utilisation dans des conditions réelles, permet tout de même de croire qu'une solution est tout près. Les résultats sont prometteurs. L'architecture «super-lattice», développée par l'UQAT, fonctionne bien en simulation avec une onde sinusoïdale. Il restera donc à l'implanter dans un circuit électronique ayant la capacité de traitement nécessaire pour exécuter la tâche. Cette étape pourra être éventuellement exécutée par une entreprise privée ayant une licence de fabrication et dont le but sera d'en faire la commercialisation.

APPLICABILITÉ DES RÉSULTATS

Dans l'état actuel du projet, le circuit électronique du protecteur auditif à réduction de bruits dominants n'est pas applicable dans un environnement minier ni dans tout autre environnement industriel. L'algorithme implanté dans le processeur ne peut traiter les sons et bruits complexes d'un milieu industriel. La capacité de traitement du processeur est directement en cause dans le constat précédent.

Par contre, les résultats obtenus par simulation, sur une onde sinusoïdale pure auquel des signaux vocaux ont été juxtaposés, démontrent bien qu'une fois implanté dans un circuit assez puissant, l'algorithme de réduction de bruits dominants abaisserait le niveau sonore d'une onde sinusoïdale forte et relèverait le niveau sonore des signaux vocaux. Par contre, il reste beaucoup de travail à faire avant de pouvoir implanter un algorithme capable de réduire les bruits réels tout en restituant les signaux vocaux.

Il est difficile d'évaluer à ce moment le coût de fabrication en série d'un tel protecteur auditif. Le coût en pièces des prototypes fabriqués est d'environ 600$ sans compter les heures pour le soudage et le montage des pièces. En production de série, le prix des pièces ainsi que des circuits imprimés sera réduit de beaucoup. La production par des machines automatisées réduira énormément le coût de fabrication.

Une fois le développement réussi et le protecteur auditif commercialisé, ce dernier pourrait être adapté en fonction des besoins de la clientèle industrielle. Des algorithmes assortis à l'industrie des pâtes et papiers, de l'aviation, du bois de sciage et, bien sûr, de l'industrie minière, pourraient voir le jour. De plus, des mises à jour et l'ajout de fonctionnalités pourraient être commercialisées et servir à défrayer les coûts initiaux du développement.

Finalement, le circuit électronique lui-même pourrait servir de plate-forme de développement pour le domaine de la recherche universitaire sur les principes ANS, ANC, annulation d'écho ou tout autre principe utilisant les DSP. Il semble qu'il n'y ait aucun kit de développement de cette dimension et pouvant loger dans des coquilles existantes sur le marché présentement.

RETOMBÉES ÉVENTUELLES

Parmi les retombées éventuelles d'un tel protecteur, il y a la diminution du taux de surdité chez les travailleurs en milieu minier dû à la réduction de l'exposition aux bruits dans l'environnement de travail souterrain. De grandes sommes d'argent sont dépensées, chaque année, en compensation aux travailleurs pour ce problème. La réduction du bruit, entraîné par le port de ce protecteur auditif, ne se ferait pas au détriment de la capacité d'entendre les signaux vocaux. Le niveau de sécurité se retrouve donc amélioré de par le fait même pour les travailleurs.

Ce même protecteur pourrait être utilisé dans d'autres secteurs industriels où les besoins de réduire le bruit environnant et de garder la capacité d'entendre certains sons utiles sont présents. Tel que discuté précédemment, la technologie employée, dans le protecteur auditif, permet de modifier et d'adapter ce dernier en fonction des besoins précis des différents types d'industrie. L'entreprise manufacturière d'un tel protecteur auditif, pourrait le commercialiser en une version de base et vendre des fonctionnalités avancées en supplément. Ce principe est utilisé dans d'autres secteurs d'activité commerciale.

Un aspect intéressant, et non discuté jusqu'à maintenant de cet algorithme, est qu'il pourrait être implanté dans des circuits de reconnaissance de la parole ou de commande par la voix comme filtre d'entrée des microphones. Il pourrait être commercialisé dans le domaine des ordinateurs, des machines semi-automatisées, de la téléphonie cellulaire ou tout autre domaine où la reconnaissance de la parole en milieu bruyant serait utile et qui peuvent avoir un impact sur la sécurité du personnel et du public en général.

BIBLIOGRAPHIE

Brevets

[Chaplin-87] «Method and Apparatus for Reducing Repetitive Noise Entering the Ear» George B.B. Chaplin, Roderick A. Smith, Terrence P.C. Bromer, US Patent 4,654,871, 31 mars 1987.

[Allie-88] «Active Attenuation System with Increased Dynamic Range» Mark C. Allie, Geoffrey S. Bailey, US Patent 4,736,431, 5 avril 1988.

[Twiney-90] «Noise Reduction System» Robert C. Twiney, Anthony J. Salloway, US Patent 4,953,217, 28 août 1990.

[Sasaki-92] «Noise Reducting Receiver Device» Tooru Sasaki, Masashi Ohkubo, Akira Kimura, US Patent 5,091,954, 25 février 1992.

[Andrea-93] «Adaptive Noise Cancellation and Speech Enhancement System and Apparatus Therefor» Douglas Andrea, John Kowalski, US Patent 5,251,263, 5 octobre 1993.

[Andrea-95] «Noise cancellation apparatus», Douglas Andrea & Martin Topf, US Patent 5,381,473, 10 jan 1995.

[Hashimoto-95] «Noise Suppressor» Hiroyuk Hashimoto, Kenichi Terai, Yasutochi Nakama, Hirouari Ogata, Chie Yamo, US Patent 5,388,160, 7 février 1995.

[Silverberg-95] «Outbound Noise Candellation for Telephonic Handset» Michael H. Silverberg, Roger D. Benning, Norman B. Thompson, US Patent 5,406,622, 11 avril 1995.

[Hotvet-96] «Directional Ear Device with Adaptative Bandwidth and Gain Control», David A. Hotvet, Savage, Minn, US Patent 5,550,923, 27 août 1996.

[Darlington-97] «Ear Defenders Employing Active Noise Control», Paul Darlington, Gerald A. Powell, US Patent 5600,729, 4 février 1997.

[Kellermann-97] «Mobile Radio set Comprising a Speech Processing Arrangement», Walter Kellermann, US Patent 5,602,962, 11 février 1997.

[Matouk-97] «Active Noise Suppression System for Telephone Handsets and Method», Anthony E. Matouk, Dieter Enzmann, Ahmet Karakasoglu, US Patent 5,625,684, 29 avril 1997.

[Itoh-98] «Acoustic Noise Suppressor» Kenzo Itoh, Masahide Mizushina, US Patent 5,757,9387, 26 mai 1998.

[Romesburg-99] «Noise Suppressor Circuit and Associated Method for Suppressing Periodic Interference Componenet Portions of a Communication Signal» Eric Douglas Romesburg, Chapel Hill, US Patent 5,903,819, 11 mai 1999.

[Sih-99] «Echo Canceller with Talk State Determination to Control Speech Processor Functional Elements in a Digital Telephone System» US Patent 5,920,834, 6 juillet 1999.

[Mauro-00] «Noise Suprression System and Method» Anthony P. Mauro, US Patent 6,122,384, 19 septembre 2000.

[LeBouquin-Jeannès -01] «Combined noise and echo reduction in hands-free system survey», LeBouquin, Jeannès et al., IEEE transactions on speech and audio processing Vol. 9, No. 8, September 2001.

Articles et revues

[Sen Kuo et Dennis R. Morgan] «Active Noise Control Systems: Algorithm and DSP implementation», éditeur Wiley Intersience (1996).

[Fang-95] «New Split Algorithms for Linear Least Squares Predistion Filters with Linear Phase», Wen-Hsien Fang, Yang-Lung Hwang, IEEE, 1995.

[Milosauvlijevic-95] «Estimation of Nonstationary ar Model Using the Weighted Recursive least Square Algorithm», M. Milosavlijevic, Dj. Veinovic, B. D. Kovacevic, 0-7803-IEEE, 1995.

[Tahernezhadi-95] «Real-time Implementation of an IIR Acoustic Echo Canceller on ADSP21020», M: Tahernezhadi, L. Liu, IEEE, 1995.

[Mayyas-95] «A Robust Variable Step Size LMS-Type Algorithm : Analysis and Simulations», K. Mayyas, T. Aboulnasr, IEEE, p. 1408-1411,1995.

[Shorten-95] «Robust Parameter Tracking Through Regional Forgetting» Robert Shorten, Andreas Schütte, A.D. Fagan, IEEE, p. 1440-1443,1995.

[Belt-95] «Adaptative Line Enhancement Using a Second-order IIR Filter» H.J.W. Belt, A.C. den Brinker, F.P.A. Benders, IEEE, p. 1444-1447, 1995.

[Bjarnason-93] «Analysis of the Filtered-X LMS Algorithm» Elias Bjarnason, IEEE, 511-514, 1993.

[Le-97] «Brève comparaison des casques à principe actif pour une utilisation dans l'environnement minier», CIM, Vol.90, No.1014, pp.55-60. Oct 97.

[Radenkovic-99] «Optimality and Almost Sure Convergence of Adaptive IRR Filters with Output Error Recursion» Miloje Radenkovic, Tamal Bose, Tanawat Mathurasai, Academic Press, Digital Signal Processing 9, p. 315-328, 1999.

[Anderson] «Noise Suppression in Speech using Multi-Resolution Sinusoidat Modeling» David V. Anderson, mark A. Clements, Centre for Signal and Image Processing, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA.

[Mader-00] «Step-size con rol for Acoustic Echo Cancellation Filters – an Overview» Andreas Mader, Henning Puder, Gerhard Uwe Schmidt, Elsevier, Février 2000.

[Bouchard-00] «Multichannel Recursive-Least-Squares Algorithms and Fast-Transversal-Filter Algorithms for Active Noise Control and Sound Reproduction Systems» Martin Bouchard, IEEE Transactions on speech and Audio Processing, Vol 8, No 5, Septembre 2000.

[Yu-00] «Implementation of Cyclostationary Signal-Based Adaptive Arrays» Shiann-Jeng Yu, Fang-Biau Ueng, Elsevier, Signal Processing 80 (2000) p. 2249-2254, Janvier 2000.

[Rusu-00] «Adaptive Data Echo Cancellation Using Cost Function Adaptation» Corneliu Rusu, Colin F.N. Cowan, Elsevier, signal Processing 80 (2000) p. 2457-2473, Mars 2000.

ANNEXE 1 - PRINCIPE DE BASE DE L'ANC ET DE L'ANS

LE PRINCIPE DE BASE DE L'ANC ET DE L'ANS

Active Noise Cancelling (ANC)

L'ANC (Active Noise Cancelling) désigne un principe par lequel on applique un contre signal, issu du signal original, ayant pour but de neutraliser le signal original. Le circuit est composé d'un microphone extérieur, d'un circuit électronique de contre-réaction, d'un haut-parleur et d'un microphone d'erreur situé à l'intérieur de la coquille. Le microphone d'erreur est placé le plus près possible de l'endroit où on désire annuler le bruit. Dans la plupart des cas, cet endroit est l'oreille du porteur du protecteur auditif. Ce dernier capte la somme du bruit et du contre signal. Si le circuit électronique était parfait, il serait capable de reproduire un contre signal permettant d'annuler totalement le bruit au niveau de l'oreille.

Comme il est impossible de mesurer la somme du bruit et du contre signal au niveau du tympan, il se pourrait que cette somme ne soit pas nulle à ce point précis du conduit auditif. C'est pourquoi certains auteurs ont proposé d'utiliser 2 microphones alignés (figure 9) pour faire une projection de la variation de pression au niveau du conduit auditif, un genre de microphone virtuel. En fait, le placement de deux microphones d'erreur à l'intérieur de la coquille permet de calculer la densité d'énergie à minimiser à l'entrée du conduit auditif plutôt que la pression elle-même.

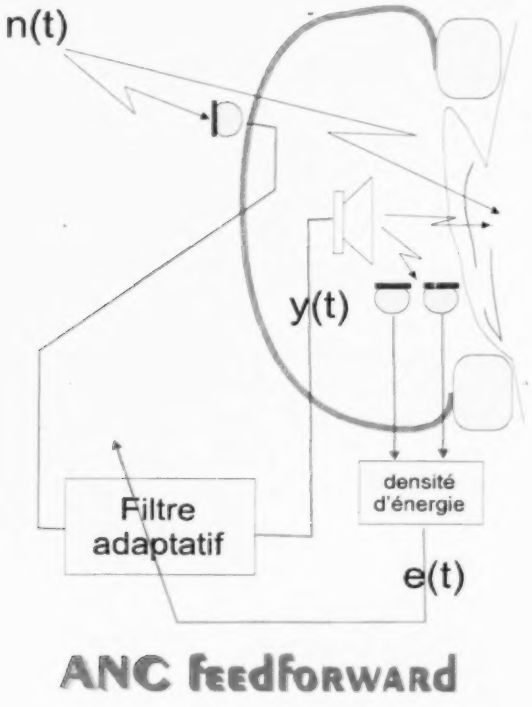


Figure 9 – Principe de base de l'ANC

Une telle configuration n'a pas encore été expérimentée. Les études scientifiques n'en sont encore qu'au stade des simulations en chambre anéchoïque. Ce qu'il faut surtout retenir du principe ANC, c'est qu'il cherche à tout annuler, bruits et signaux utiles, mais de façon très locale.

Active Noise Suppression (ANS)

L'ANS (Active Noise Suppression) désigne un principe par lequel un premier signal est soustrait à un second pour annuler seulement une partie du second signal.

Il serait possible d'utiliser le même principe que pour l'ANC avec le principe de l'ANS, mais avec un filtre adaptatif dont le temps de réaction serait lent. De cette façon, il ne serait pas en mesure de générer le contre signal pour les variations rapides et ainsi laisserait passer les signaux vocaux. Cependant, comme la coquille elle-même affaiblit et modifie le signal et le bruit à l'intérieur, et que le filtre adaptatif a besoin d'une forte corrélation sur les bruits parvenant au microphone extérieur et sur le microphone d'erreur pour s'adapter. Cette corrélation se détruit à mesure que le haut-parleur génère le contre signal qui détruit lesdits bruits, il s'ensuit que le système est beaucoup plus instable à mettre en œuvre.

Le principe des 2 microphones utilisés dans ce projet se fonde sur l'observation suivante: une source de bruit, placée à grande distance, parvient aux deux microphones placés sur la coquille de protection auditive avec une amplitude équivalente, mais avec un certain délai selon l'orientation de l'ensemble par rapport à la source de bruit. En égalisant quelque peu l'amplitude et surtout la phase, il est possible d'en faire la soustraction et ainsi éliminer le bruit. Étant donné que la bouche du porteur est plus proche de l'un des microphones que de l'autre placé diamétralement à l'opposé, toute émission sonore rapprochée sera en déséquilibre d'amplitude aux microphones. L'émission sonore rapprochée (telle que la voix) subsistera donc lors de la soustraction.

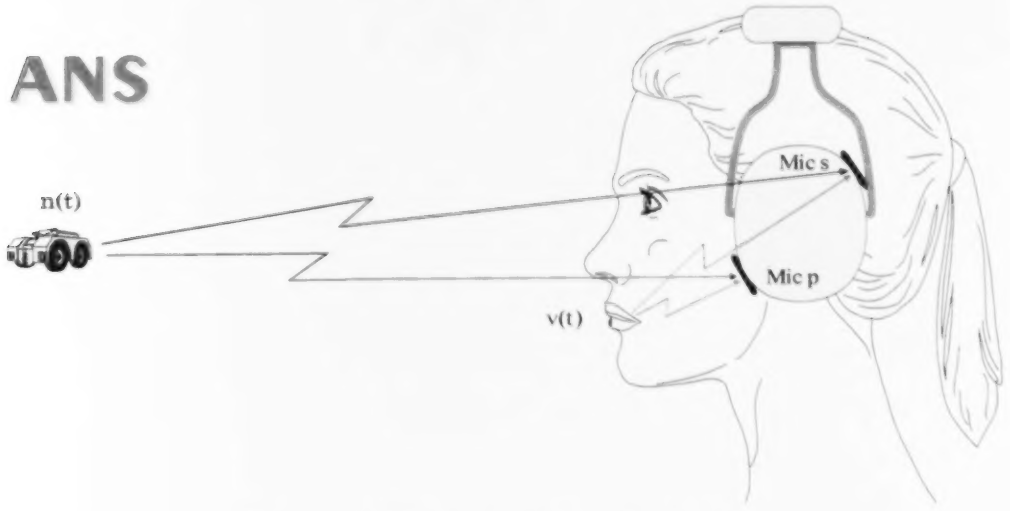


Figure 10 – Principe de base de l'ANS

Ce principe a été expérimenté dans la version analogique fabriquée en 1994. Ce modèle était basé sur l'hypothèse de la monotonie du bruit fort et des hautes variations du signal vocal. Si le circuit pouvait se cadrer, d'une certaine façon, sur le bruit fort, les modules chercheraient à réaligner les déphasages et les amplitudes afin de permettre une soustraction exacte du bruit. Comme les autres composantes du signal, dont la voix, n'ont pas été réalignées, la soustraction ne les éliminent pas. Il s'agit d'un filtre de nature coupe-bande (notch filter) sur le bruit et non pas un filtre de type sélectif (bandpass filter) sur le signal vocal.

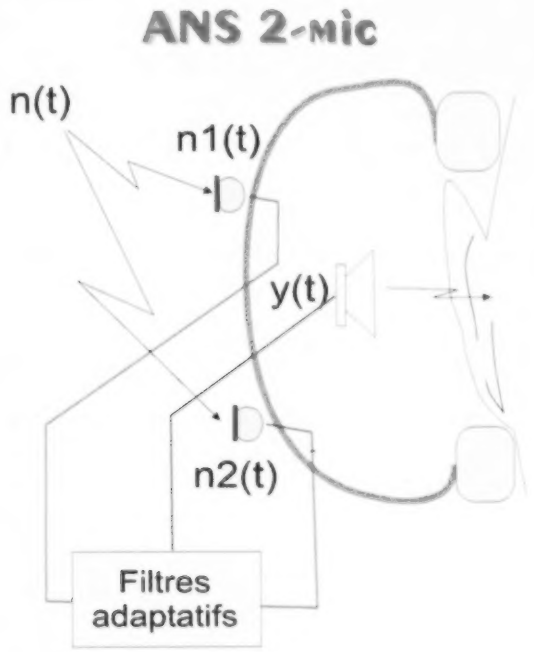


Figure 11 – ANS à 2 microphones

L'architecture de l'ANS est plus symétrique. Les microphones sont placés tous les deux à l'extérieur et recueillent un signal quasi équivalent. Le microphone d'erreur de l'ANC devient le microphone secondaire en ANS. Le haut-parleur est utile pour restituer au niveau du porteur les signaux vocaux bloqués par la coquille mais ne serait pas nécessaire dans le cas d'utilisation dans les circuits d'entrée de systèmes de reconnaissance de la parole ou de commande vocale.

ANNEXE 2 - DÉTAILS SUR L'ANS

La structure de base présentée à la figure 5 du rapport n'est qu'un des blocs rudimentaires du protecteur auditif. En effet, si on adjoint un haut-parleur à l'intérieur pour restituer l'environnement auditif, il faut implanter des filtres anti-échos acoustiques pour empêcher le casque de siffler ou d'avoir un comportement erratique. De plus, il a été remarqué que l'implantation des filtres symétriques restituait davantage l'environnement, car les signaux réduits des 2 microphones sont mis à contribution dans le haut-parleur. Idéalement, une série de microphones autour de la coquille de protection aurait été nécessaire. Certains casques commerciaux font appel à un seul microphone dont le son est amplifié à l'intérieur comme principe actif. Ce genre de casque donne une impression de lointain, puisque nous nous servons de nos pavillons auriculaires pour localiser les sources sonores dans l'espace environnant. La figure 6 démontre le principe de ce type de casque.

Rôle des lignes à retard pures

Le calcul de retard de propagation acoustique maximal entre le microphone 1 et le microphone 2, qui sont placés sur la coquille à une distance d'environ 7,5 cm l'un de l'autre est :

$$\frac{341\,\text{m}}{1\,\text{sec}} = \frac{7.5\,\text{cm}}{t_d\,\text{sec}} \Rightarrow t_d = \frac{0.075\,\text{m}}{341\,m/s} = 220\,\mu s$$

Or à la vitesse d'échantillonnage de 64 kHz, la période entre deux échantillons successifs est de :

$$T_s = \frac{1}{64\,kHz} = 15.625\,\mu s$$

C'est à dire qu'il faut environ 16 *taps* dans la ligne à retard. Comme les filtres G_1 et G_2 ne peuvent que provoquer qu'un retard du signal et non l'avancer, si le bruit parvient au microphone 1 avant le microphone 2, G_1 pourra jouer son rôle. Pour G_2, il faut faire intervenir la ligne à retard pure partant de $n_1(t)$ avant de venir comparer avec la sortie de G_2.

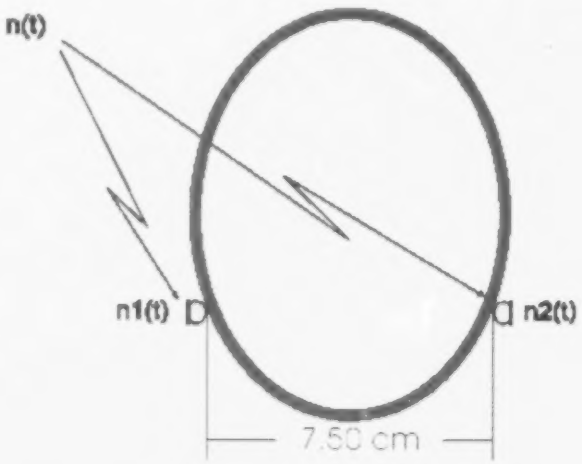


Figure 12 – Distance entre les microphones

Un autre avantage de l'installation de ces lignes à retard pures, est de pouvoir dé corréler le signal de retour par le haut-parleur vers les microphones de capture. Cependant, ce retard maximal est obtenu en ligne droite. Dans la réalité, le retard est plus imprécis à calculer, car il faut tenir compte de la variation dans la vitesse de propagation acoustique selon le taux d'humidité dans l'environnement minier, du chemin après de multiples réflexions sur les parois rocheuses, et de la position relative des 2 microphones par rapport à la source de bruit. Il en résulte que le délai peut varier. Nous ne pouvons cependant trop allonger le délai car il y risque de gêne dans l'écoute. En pratique, après plusieurs essais, le délai a été fixé à 4 *taps*.

Contraintes dans la longueur minimale des filtres G1 et G2 :

Il est évident que si l'on a implanté les lignes à retard pures avec 16 *taps*, il faut que la longueur des filtres G_1 et G_2 soient au moins du double. En effet, supposons la situation où le signal arrive avec un délai de 16 *taps* sur le microphone 2 après être arrivé sur le microphone 1. Le délai de 16 *taps* imposé systématiquement sur $n_1(t)$ par la ligne de retard pure équilibre exactement avant sa comparaison avec la sortie de G_2. G_2 utilise donc les 32 *taps* au complet, sans produire de retard ou d'avance. Par contre, le signal $n_2(t)$ arrivera avec un retard supplémentaire de 16 *taps* à la comparaison avec la sortie de G_1. C'est pourquoi G_1 doit avoir au moins le double de coefficients pour effectuer le même retard de 32 *taps*. Supposons la situation intermédiaire où le signal arrive sur le microphone 2 après seulement un retard de 4 *taps* par rapport au microphone 1. G_2 doit retarder de 12 (16-4) *taps*, car $n_1(t)$ arrive 16 *taps* après. G_2 compense la différence. Pour G_1, le signal $n_2(t)$ arrive à 20 (16+4) *taps*, il faut que G_1 réplique ce retard de 20 (16+4). Dans le cas ou les signaux arrivent en phases, les signaux de comparaison étant retardés de 16 *taps* exactement, les filtres G_1 et G_2 n'ont qu'à en faire autant de 16 *taps*.

En conclusion, en position de synchro-phase, le filtres G_1 et G_2 n'utilisent pas les 16 premiers coefficients. En position de délai extrême, l'un se sert des 16 premiers coefficients, tandis que l'autre n'utilise pas ses 32 premiers coefficients. Afin de restituer un signal complexe dans un environnement minier, les simulations avec Matlab-Simulink dicte le nombre de coefficients entre 200 et 600 pour un algorithme LMS. Mais nous savons déjà qu'un simple algorithme LMS de base est insuffisant pour traduire la complexité du bruit dans un environnement minier.

6 champs de recherche en santé et en sécurité du travail

- Accidents
- Bruit et vibrations
- Équipements de protection
- Sécurité des outils, des machines et des procédés industriels
- Substances chimiques et agents biologiques
- Troubles musculo-squelettiques

Nos recherches *travaillent* pour VOUS !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) contribue, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes.

POUR EN SAVOIR PLUS...

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.

irsst

www.irsst.qc.ca